

В. А. Замараев*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
г. Екатеринбург

*89634430235@mail.ru

Научные руководители доцент, канд. техн. наук Л. М. Железняк

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА МЕДНОСЕРЕБРЯНЫХ ПОЛОС, ПРИМЕНЯЕМЫХ В ТУРБОГЕНЕРАТОРАХ

Проведенные в условиях производства исследования с целью повышения уровня физико-механических характеристик полос из медносеребряного сплава – удельного электросопротивления, временного сопротивления разрыву, предела текучести, относительного удлинения – явились основой для разработки и реализации нетрадиционного технологического регламента при выпуске промышленных партий полос.

Ключевые слова: медносеребряный сплав, полосы для обмоток роторов турбогенераторов, высокие требования, физико-механические свойства.

V. A. Zamaraev

FEATURES OF CU-AG BANDS FOR GENERATORS

Held in conditions of research production with the aim of increasing the level of physical-mechanical characteristics of strips of magnocurarine alloy – specific resistance of the temporary rupture strength, yield strength, elongation – the basis for the development and implementation of non-traditional technological regulations for production of industrial batches of strips.

Keywords: rednoseday alloy, strip for winding rotors of turbine generators, high demands, physical and mechanical properties.

Мягкие медные шины используют при высоких токах и низком напряжении: линии питания нагревательных печей и ванн для электролиза, распределительные щиты; шкафы управления и др. При повышенных, но кратковременных механических нагрузках применяют шины полутвердого состояния с увеличенной прочностью и сниженной пластичностью. Стандарта РФ на полутвердые медные шины нет, и они должны соответствовать требованиям ENBS[1]: $\sigma_B \geq 250$ МПа; $\sigma_{0.1} = 170\text{--}230$ МПа; $\delta_{10} = 10\text{--}15$ %. Для этого применяют способ [2]: шины изготавливают за два прохода волочения с промежуточным полным отжигом при $t = 650 \pm 30$ °С. При относительном обжатии в 1-м проходе $\varepsilon = 20\text{--}28$ % и во 2-м, чистовом, при $\varepsilon = 7\text{--}10$ % получали: $\sigma_B = 300\text{--}310$ МПа; $\sigma_{0.1} = 167\text{--}227$ МПа; $\delta_{10} = 10\text{--}15$ %, что отвечает требованиям стандарта [1].

Однако такие прочность и пластичность, соответствующие назначению полутвердых медных шин, неприемлемы для полос из серебряной бронзы БрСр0,1 с содержанием серебра 0,03–0,1 %, если учитывать предъявляемые к ним жесткие требования, а также способность этого сплава по сравнению с медью к достижению более высоких служебных свойств.

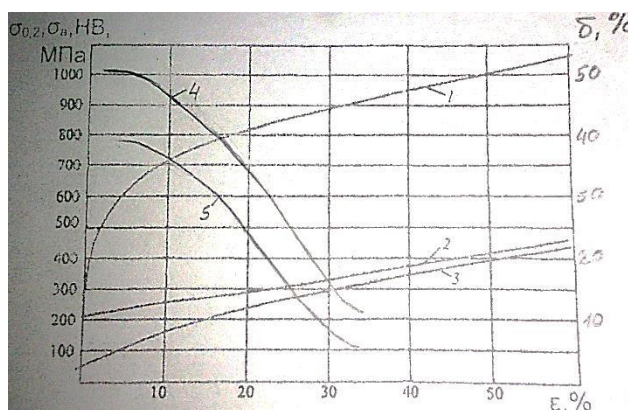
Одна из наиболее ответственных областей применения медносеребряных шин – обмотки роторов турбогенераторов, работающие при повышенных механических и электрических нагрузках, и они должны иметь $\sigma_{0,2} \geq 132,5$ МПа; $\delta_{10} \geq 30$ % и $\rho \leq 0,01850$ Ом·мм²/м [3], что соответствует четвертьнагартованному состоянию. Высокий уровень качества полос толщиной 5–8 мм и шириной 24–28 мм [3] определяется конструкцией обмоток роторов и их монтажа на предприятиях турбинного электромашиностроения. При многократных их изгибах в процессе сборки в секции роторов они не должны терять пластичности, т. е. появления микро- и макротрещин, на их поверхности не допускаются неровности типа «апельсиновой корки» – признак увеличенных размеров зерна. Анализ служебных характеристик полос показал, что возможности снижения ρ полос исчерпаны, если ориентироваться только на требования ТУ [3]. Для выхода из этой ситуации предприняли следующее.

Известные технические решения [4–6 и др.] имеют недостаток – жесткое разграничение режимов при получении только твердых (с высоким σ_B и пониженным δ) или только мягких (с пониженным σ_B и высоким δ) полос; получение полос с другими уровнями прочности и пластичности этими решениями не достигается. Для сплава с содержанием серебра вблизи нижнего предела требуемое сочетание $\sigma_{0,2}$ и δ при обработке по традиционным схемам становится практически недостижимым, поскольку, с одной стороны, получение $\sigma_{0,2}^{\min} = 132,5$ МПа должно быть обеспечено повышенным ϵ в чистовом проходе волочения, а с другой стороны, повышенное ϵ приводит к $\delta_{10}^{\min} < 30$ %. Поэтому на производстве поддерживают содержание серебра в сплаве вблизи верхней границы (0,1 %), что, помимо удорожания полуфабриката, затруднительно по следующим причинам.

В производстве, наряду с достаточно легко управляемыми факторами – $\epsilon_{\text{гор}}$ при прессовании заготовок под волочение на горизонтальном гидравлическом прессе, $\epsilon_{\text{хол}}$ при волочении; режимов промежуточного отжига и др. возникают условия, при которых варьирование рядом параметров затруднительно. Недостатком известных решений [4–6] является использование в качестве основы сплава меди марки М0к (ГОСТ 859 – 2001 [7]).

Авторами разработан нетрадиционный технологический регламент, согласно которому для получения $\rho \leq 0,01748$ Ом·мм²/м в качестве основы сплава используют катодную медь марки М00к, а для достижения

$\sigma_{0,2} = 150\text{--}180$ МПа и $\delta_{10} = 36\text{--}30$ % чистовое волочение проводят с $\varepsilon = 6\text{--}13$ % [9]. Проведено экспериментальное исследование и построены графические зависимости прочностных ($\sigma_{\text{в}}$, $\sigma_{0,2}$, НВ) и пластических (δ_5 , δ_{10}) свойств от ε (рисунок) для бронзы БрСр0,1 (с содержанием серебра 0,1%). Градация состояний сплава БрСр0,1 приведена в таблице.



Зависимость свойств БрСр0,1 от относительного обжатия:

1 – твердость НВ; 2 – $\sigma_{\text{в}}$; 3 – $\sigma_{0,2}$; 4 – δ_5 ; 5 – δ_{10}

Механические свойства сплава БрСр0,1 в разном состоянии нагортки

Состояние	ε , %	Прочностные свойства, МПа		Пластические свойства, %	
		$\sigma_{0,2}$	$\sigma_{\text{в}}$	δ_{10}	δ_5
Нагартванное на 1/4	0 – 5	50 – 110	210 – 230	40 – 28	51 – 42
Полунагартванное	5 – 17	110 – 220	230 – 280	28 – 23	42 – 33
Нагартванное на 3/4	17 – 33	220 – 310	280 – 350	23 – 15	33 – 25
Полностью нагартванное	33 – 55	310 – 420	350 – 450	6	12

Аналогично проведенная градация δ для различных состояний сплава также приведена в таблице, из которой следует, что требуемые значения $\delta_{10} \geq 30$ % (четвертьнагартванное состояние) достигаются при $\varepsilon = 0\text{--}13$ %, а требуемые значения $\sigma_{0,2} \geq 132,5$ МПа (полунагартванное состояние) достигаются при $\varepsilon = 6\text{--}17$ %. Следовательно, приемлемые для обеих механических характеристик значения ε должны находиться в интервале от 6 до 13%. Достоверность полученной информации позволила рассчитать соответствующие режимы обжатий и спроектировать технологию производства полос, удовлетворяющим всем требованиям ТУ.

Целесообразность установленного диапазона $\sigma_{0,2} = 150\text{--}180$ МПа с целью решения поставленной задачи основана на следующем. Нижняя граница $\sigma_{0,2} = 150$ МПа превышает нормированный в [3] нижний предел на величину $150 - 132,5 = 17,5$ МПа. Согласно применяемой на заводах практике по использованию принятой до введения системы СИ размерности напряжений (в виде кгс/мм²), погрешность испытательной машины обычно составляет 1–2 кгс/мм², и тогда значение 17,5 МПа вполне коррелирует с величиной этой погрешности, поскольку $17,5 / 9,81 = 1,7$ кгс/мм².

Наличие множества изгибов полос при монтаже и сборке турбогенератора предполагает их высокую пластичность без появления признаков разрушения, позволяющую проводить гибочные операции с малыми радиусами изгиба, что снижает габариты машины. Чтобы обеспечить достаточную пластичность при проведении указанных операций, величина δ_{10} должна быть не менее 30 % [3]. Это достигается при $\varepsilon \leq 13$ % в чистовом проходе волочения. При $\varepsilon=13\%$ значение $\sigma_{0,2}$ составляет 180 МПа, поэтому именно эта величина $\sigma_{0,2}$ и принята в качестве верхней границы диапазона. С другой стороны, соблюдение требования $\sigma_{0,2} \geq 132,5$ МПа накладывает ограничение на нижний предел $\varepsilon = 6$ %, при котором $\delta_{10} = 36$ %.

Электропроводность электротехнических материалов сильно зависит от доли примесей в сплаве, поэтому значимым фактором, позволившим решить поставленную задачу повышения электропроводности, явился переход от использования меди марки М0к (как основа сплава) к меди марки М00к. Известно, что наиболее негативное влияние на электропроводность меди оказывают железо и свинец, а из неметаллов – сурьма и мышьяк. Сопоставление содержания их долей в меди М00к по сравнению с медью М0к составляет: по мышьяку – в 2 раза, по сурьме – в 2,5 раза, по свинцу – в 4 раза. Таким образом, использование меди М00к, положительно повлияло на электропроводность полос. В частности, минимизации содержания примесей железа достигли следующим приемом. Ранее в качестве защитного покрова использовали покупную графитовую крошку с повышенным содержанием железа, обусловленным приготовлением ее размалыванием в шаровой мельнице. Поэтому организовали изготовление этой крошки в условиях собственного производства.

Эти мероприятия снизили ρ с 0,01850 до 0,01748 Ом•мм²/м. Может показаться, что достигнутое снижение ρ на 5,51 % является несущественным. Однако это не так, если учитывать следующие важные обстоятельства [8].

1. При снижении электросопротивления увеличивается линейная нагрузка электромашины; следовательно, возрастает ток и повышается эффективность использования материала проводника – БрСр0,1. Таким образом, важны даже десятые доли процента снижения электросопротивления.

2. С уменьшением электросопротивления прямо пропорционально снижаются электрические потери, сокращаются материальные затраты при создании машины за счет: уменьшения размеров магнитного ядра машины; сокращения потребного сечения медносеребряной полосы; снижения класса изоляции.

3. Вследствие снижения электросопротивления уменьшаются тепловыделение и затраты на вентиляцию; эффективность ее работы является исключительно важной из-за малых габаритов турбогенератора.

В результате выполненного комплекса мероприятий организовано производство медносеребряных полос, механические свойства которых гарантированно превышают минимальные регламентированные значения ($\sigma_{0,2} = 132,5$ МПа и $\delta = 30\%$) и находятся в оговоренных пределах ($\sigma_{0,2} = 150\text{--}180$ МПа и $\delta = 30\text{--}36\%$). Удельное электросопротивление полос $\rho = 0,01745$ Ом•мм²/м ниже установленного в ТУ минимального значения, равного $0,01748$ Ом•мм²/м. В конечном итоге получили готовые полосы, полностью соответствующие требованиям нормативного документа, но с повышенной стабильностью физико-механических характеристик изделий, т.е. с улучшенными потребительскими качествами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Specification for Copper for Electrical Purposes, Rod and Bar. DS1432:1977. British Standard Institution. London, 20 p.
2. Пат. РФ на полезную медь №48997. Медная шина полутвердого состояния / А.В. Спиридонов, П. А. Василевский, Л. В. Радионов, Л. М. Железняк // БИ. 2005. № 31.
3. ТУ 48–21–188–80. Полосы прямоугольные из сплава меди с серебром. ОКП 184420. Группа В53.
4. Авт. свид. № 371986 СССР. Способ изготовления коллекторных профилей / Л.М. Никифоров, Ю. Я. Хаюров, В.Г. Воронько, Е.Н. Злацин // БИ.1973. № 13.
5. Освоение выпуска медных электротехнических профилей на прокатно-волочильном стане / П. А. Василевский [и др.] // Цветная металлургия. 1996. № 4. С.24–38.
6. Нестандартные электротехнические профили из меди / В. Н. Краснов [и др.] // Металлоснабжение и сбыт. 2004. № 2.
7. ГОСТ 859-2001. Медь. Марки. – 7 с.
8. Турбогенераторы. Расчет и конструкция / В.В. Титов [и др.]. Л.: Энергия, 1967. С. 895.
9. Пат. № 2317867 РФ. Способ изготовления полосы прямоугольного сечения из медносеребряного сплава / Н. С. Арсентьева, А. И. Снигирев, Л. М. Железняк // БИ. 2008. № 6.